



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

## **Sigfox, LoRa ja NB-IoT -verkkojen vertailu**

Viljami Kontu

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö 2020

# TIIVISTELMÄ

Sigfox, LoRa ja NB-IoT -verkkojen vertailu

Viljami Kontu

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintutkinto + 2020, 30 s.

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Yrjö Louhisalmi

Kandidaatintyön tavoitteena on tutkia ja vertailla kolmea eri Internet of Things – verkkoa. Työssä pyritään selvittämään ja tutkimaan verkkojen tekniset ominaisuudet, käyttökohteet ja kustannukset. Selvitysten jälkeen verkkoja verrataan keskenään ja tutkitaan niiden eroavaisuudet. Työssä käytetään hyväksi jo tehtyjä tutkimuksia liittyen mainittuihin verkkoihin ja laajaa tiedonhakua liittyen IoT – verkkoihin. Työssä pyritään saamaan tulokseksi kattava tutkimus ja vertailu kolmen eri verkon välillä. Työstä tulokseksi saatavaa vertailua voi hyödyntää verkkojen valinnassa ja vertailussa.

# **ABSTRACT**

Comparison of Sigfox, LoRa and NB-IoT networks

Viljami Kontu

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis + 2020, 30 p.

Supervisor(s) at the university: Yrjö Louhisalmi

The aim of the bachelor's thesis is to study and compare three different Internet of Things networks. Technical properties of networks, usage and costs will be pursued to investigate and find out. After the surveys, the networks are compared and examined for these differences. Wide information retrieval and researches concerning these three IoT-networks are used in this thesis. The goal is to achieve comprehensive research and comparison between the networks. The result of the thesis should be able to be used in the selection and comparison of networks.

# ALKUSANAT

Kandidaatintutkiealmani on osa tutkintoani Oulun yliopistossa. Työni aiheena on vertailla LoRa, Sigfox ja NB-IoT -verkkoja keskenään eri parametreilla. Työ perustuu aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen ja aiempiin tutkimuksiin.

Haluan kiittää työn ohjauksesta Yrjö Louhisalmea.

Oulu, 31.3.2020

Viljami Kontu

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO.....	7
2 INTERNET OF THINGS.....	8
2.1 Teknologiat .....	9
2.2 Käyttökohteet.....	10
3 LORA, SIGFOX JA NB-IOT.....	12
3.1 LoRa .....	12
3.2 Sigfox .....	14
3.3 NB-IoT .....	16
4 VERTAILU .....	19
4.1 Quality of Service .....	20
4.2 Suorituskyky .....	20
4.3 Akunkesto ja hinta.....	21
4.4 Kuuluvuus ja viive .....	21
4.5 Turvallisuus .....	22
4.6 Käyttökohteet.....	23
4.6.1 Mittalaitteet.....	23
4.6.2 Älyrakennukset ja -kaupungit.....	24
4.6.3 Maatalous.....	24
5 YHTEENVETO.....	26
LÄHDELUETTELO.....	27

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

BPSK	Binary Phase-Shift Key
CSS	Chirp Spread Spectrum
GIS	Geographic Information System
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial-Science-Medical
LTE	Long Term Evolution
LPWAN	Long Range Wide Area Network
MAC	Medium Access Control
M2M	Machine-to-machine
OFMDA	Orthogonal Frequency-division multiple access
OFMD	Orthogonal Frequency-division multiplexing
QoS	Quality of Service
UNB	Ultra Narrow Band

# 1 JOHDANTO

Kandidaatintutkielmani aiheena on LoRa, Sigfox ja NB-IoT -verkkojen vertailu. Aihe kiinnostaa minua, sillä Internet of Things -verkkoihin liitettävistä laitteista iso osa on erilaisia antureita ja toimilaitteita, jotka kuuluvat olennaisesti opiskelemaani alaan. Internet of Things -verkot tulevat myös nykyään osaksi älykkäitä koneita ja järjestelmiä. Internet of Things on nousemassa koko ajan yleisemmäksi niin arkielämässä kuin teknologiateollisuudessa. Tiedonsiirron tulevaisuus on yhä enemmän kehittymässä kohti langatonta viestintää. Haluan rakentaa uraani älykkäiden koneiden alalla, joten aiheesta kertynyt tieto todennäköisesti hyödyttää minua tulevaisuudessa.

Internet of Things on kehittynyt viime vuosina suuresti ja se on suhteellisen uutta teknologiaa varsinkin arkielämän käyttöönotoissa. Aiheesta on tehty paljon erilaisia tutkimuksia ja tietoa on saatavilla hyvin paljon. Tässä työssä käytetään hyväksi jo aiemmin tehtyjä tutkimuksia ja verkkoja tarjoavien yritysten selosteita. Tutkielmani on täten toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Vaikka aiheesta on paljon tutkimuksia saatavilla, on aiheesta hyvä tehdä päivitetyillä tiedoilla olevia tutkielmia. Niin kuin aiemmin jo sanottua, Internet of Things on kehittynyt ja kehittyy todella nopealla vauhdilla. Internet of Things on laaja käsite. Se sisältää paljon monimutkaista teknologiaa, varsinkin kun verkkoja tarkastellaan verkkokohtaisesti. Työ on täten rajattu vertailun osalta ominaisuuksiin ja käyttökohteisiin. Tiedonsiirtotekniikkoihin ja verkkojen yksityiskohtaiseen toimintaan ei tässä työssä syvällisesti perehdytä.

## 2 INTERNET OF THINGS

Internet of Things eli IoT käsitteenä tarkoittaa yleisesti systeemiä, jossa mittalaitteet ja koneet on kytketty toisiinsa. IoT – systeemiin kytketyille laitteille ja koneille on tyypillistä, että ne jakavat tietoa toistensa välillä ilman ihmisen vuorovaikutusta. IoT – laitteeksi voidaan luokitella mikä laite tahansa, johon päästään käsiksi IP-osoitteen avulla ja se pystyy lähettämään dataa. (Rouse ym. 2020) Internet of things käsittää kuitenkin suhteellisen laajasti asioita. Se sisällyttää myös esimerkiksi suuren määrän erilaisia tekniikoita, langattomia antureita ja toimilaitteita. (Watts 2016, s.3) Myös kaukovalvonta ja -ohjaus voidaan sisällyttää IoT – käsitteeseen. IoT toimii laajennusosana jo olemassa olevassa Internetissä, eli se ei sinänsä ole oma verkkonsa. Uutta IoT:ssa on verrattuna edeltäjäänsä M2M:ään (machine-to-machine) laajempi Internetin ja sen teknologian käyttö. Tulevaisuudessa on mahdollista, että IoT-laitteet pystyvät kommunikoimaan keskenään Internetin välityksellä ihmisen tavoin. (Holler ym. 2014, s.14)

IoT -verkkojen käyttökohteiden yleisiä piirteitä ovat pitkä kantama, matala energiantarve ja kustannustehokkuus. Kehitystöiden tuloksena IoT -verkoissa on mahdollisuuksia niin lyhyen kuin pitkän matkan kantamaan, joita voidaan hyödyntää käyttökohteen vaatimusten mukaan. Normaalikuluttajan yleisimmin käytössä oleva lyhyen kantaman tekniikkaa hyödyntävä IoT -verkko on Bluetooth. Bluetooth on hyvin yleinen, etenkin audiolaitteissa. IoT -verkot ovat kehityksen edetessä alkaneet hyödyntämään matkapuhelinverkkoja. Matkapuhelinverkkojen kattavuus on yleisesti parempi, mutta niihin kytkettävät laitteet vaativat enemmän energiaa. LPWAN (low power wide area network) on suosioltaan nousussa, sillä se kuluttaa huomattavasti vähemmän energiaa kuin matkapuhelinverkot. (Mekki ym. 2019, s.1) Edellä mainitut matalatehoiset IoT -tekniikat voidaan jakaa kahteen eri ryhmään kantamansa perusteella. Matalatehoiset lähiverkot (Low power local area network) ovat kantamaltaan alle 1000m. Tällaisia verkkoja ovat esimerkiksi Bluetooth ja IEEE 802.15.4. Matalatehoiset laajan alueen verkot (LPWAN) toimivat vastaavasti yli 1000 m kantamalle. Esimerkkejä tällaisista verkoista ovat LoRaWAN ja Sigfox. (Augustin ym. 2016, s.2)



## 2.1 Teknologiat

IoT -systeemi rakentuu samaan verkkoon kytketyistä laitteista, jotka lähettävät dataa ja toimivat muilta laitteilta saadun datan perusteella. Dataa kerätään ympäristöstä lukuisten antureiden avulla. Laitteet on kytketty IoT -verkkoon tai lähetyslaitteeseen, jonka kautta data siirretään pilveen käsiteltäväksi ja sieltä eteenpäin muille laitteille. Dataa voidaan käsitellä myös paikallisesti sitä mittaavassa laitteessa. Laitteet eivät tarvitse toimiakseen ja kommunikointia ihmistä. (Rouse ym. 2020) Verkossa liikkuva data ei kuitenkaan ole välttämättä verkkoon kytketyiltä antureilta ja mittalaitteilta peräisin. Verkossa voidaan siirtää myös ulkopuolista lähteistä saatua dataa, joka on relevanttia sovelluskohteen kannalta. Esimerkki tällaisesta ulkopuolisesta datasta on paikkatietojärjestelmä GIS (Geographic Information System). (Holler ym., 2014, s.16)

IoT -verkkojen yhteysvaihtoehtoja yleisesti ovat matkapuhelinverkot tai lisensioimattomat LPWA -tekniikat. Matkapuhelinverkkoja hyödyntävät tekniikat toimivat lisensoituilla taajuuksilla ja ne tarjoavat verkolleen hyvää kuuluvuutta. Energiakustannukset näissä verkoissa ovat kuitenkin korkeat. (Kuhlins ym. 2020, s.4) LPWAN:n suosio on kasvamassa etenkin teollisuuden käyttökohteissa. Etuna sillä on matala energiantarve, pitkä kantama ja kustannustehokkuus. LPWAN -tekniikkaa hyödyntävien verkkojen kantama on kaupungissa 1-5 km ja haja-asutusalueella 10-40km. Käyttökustannukset LPWAN:lla ovat muutaman euron luokkaa vuodessa. LPWAN soveltuu parhaiten pienen datamäärän siirtoon pitkälle kantamalle. Tekniikat, jotka hyödyntävät LPWAN:ää, ovat usein lisensoineet omat kaistanleveytensä. NB – IoT käyttää lisensoitua kaistanleveyttä. (Mekki ym. 2019, s.1) Etuna matkapuhelinverkoissa on se, että ne kattavat suuren osan maapallosta ja ne ovat valmiina saatavilla IoT-verkon muodostamista varten. Lisensioimattomat LPWAN -verkot joudutaan rakentamaan sovelluskohdetta varten erikseen. (BCS, The Chartered Institute for I.T., 2017, s.19)

LPWAN:n hyviä ominaisuuksia hyödyntäviä ratkaisuja on kehitetty paljon. Tunnetuimmat ovat LoRa ja Sigfox. LoRa ja Sigfox toimivat molemmat lisensioimattomalla taajuudella siirtäen pieniä määriä dataa. Taajuudet molemmissa verkoissa ovat alle 1 GHz. Näihin verkkoihin kytkettävät laitteet ovat yleisesti ottaen edullisia ja toimivat pienellä energiantarpeella. (Liberg ym. 2017, s. 342) LPWAN -

tekniikan ja matkapuhelinverkkojen pohjalta on kehitetty myös kapeaan kaistanleveyteen perustuva NB-IoT -verkko. Kapeakaistainen NB-IoT käyttää hyödykseen matkapuhelinverkkoja ja se on optimoitu pienitehoisiin laajan alueen LPWA sovelluksiin. (Mekki ym. 2019, s.2)

## 2.2 Käyttökohteet

IoT -verkkojen on mahdollista olla muiden verkkojen tapaan niin avoimia tai suljettuja kuin salattuja tai salaamattomia. Kun puhutaan suljetussa ympäristössä käytettävästä ja salatusta IoT:sta, verkkoa voidaan kutsua nimityksellä ”Intranet of Things”. IoT -verkkojen käytölle ja sovelluskohteille ei ole rajaa. Mahdollisia sovellus- ja käyttökohteita on lukemattomia määriä. IoT -verkkoja käytetään paljon nykyaikaisessa maataloudessa, teollisuudessa kunnossapidossa ja robottien ohjauksessa. (Rouse ym. 2020) IoT -teknologiaa hyödynnetään nykyään myös turvallisuusalalla, älykaupungeissa ja -kodeissa. (Mekki ym. 2018, s.413)

Maataloudessa IoT -verkkoja voidaan hyödyntää erilaisissa mittauksissa ja valvonnassa. Mittalaitteet ja anturit voivat esimerkiksi valvoa ja ohjata kasvien kasvuympäristöä ja -olosuhteita. Kasvuolosuhteita voidaan muokata mitatun tiedon perusteella ja saada täten kasville optimaalinen kasvu. Esimerkiksi auringonvaloa mittaavan anturin mittaustiedon perusteella voidaan kasvien valonsaantia säätää automaattisesti. Näin voidaan estää liiallinen kuivuminen. Maataloudesta halutaan IoT:n avulla mahdollisimman itsenäisesti toimiva ja itseään ylläpitävä systeemi. (Holler ym. 2014, s.17)

IoT -verkot ovat myös hyvin yleisessä käytössä terveydenhoidossa ja lääketieteessä. Niiden avulla voidaan mm. tarkkailla potilaan sydämen toimintaa ja jatkaa potilaan tarkkailua sairaalasta poistumisen jälkeen. Pilvitalennus mahdollistaa lääkäreiden ja hoitajien pääsyn nopeasti ja helposti potilaan potilastietoihin ja hoitohistoriaan. Myös ensihoitajat hyödyntävät tätä ominaisuutta ja pystyvät lähettämään reaaliaikaista tietoa potilaan tilasta jo kuljetuksen aikana. Nykyään on myös olemassa lääkelaatikko, joka on kytketty IoT -verkkoon. Lääkelaatikko pystyy seuraamaan lääkkeiden lukumäärää. Kun lääkkeet ovat loppumassa, pystyy potilas tilaamaan uuden reseptin sähköisesti apteekkiin. (BCS, The Chartered Institute for I. T., 2017, s.38-39)

IoT ei kuitenkaan ole täysin ongelmaton. Suurimmat haasteet IoT -verkoissa tulevat niiden turvallisuudesta ja tiedon heterogeenisyydestä. Mittauslaitteet keskustelevat ihmisten ja muiden laitteiden kanssa, jolloin syntyy paljon heterogeenistä dataa. Tämä tuo ongelmia ja lisää vaiheita tiedon prosessointiin. Tiedonsiirron nopeus on myös yksi kasvavimmista ongelmista. Siirrettävän tiedon määrä kasvaa jatkuvasti, joka tuo ongelmia tiedonsiirtoon. Ongelmaksi muodostuu suuren tietomäärän käsitteleminen nopeasti ja hyödyllisen tiedon erottamisen suuresta tietotulvasta. Verkkojen laajentuessa ja siirrettävän datan kasvaessa myös laitteiden energian tarve ja kulutus kasvaa. (Watts ym. 2016, s.58)

### 3 LORA, SIGFOX JA NB-IOT

Kaikissa kolmessa verkossa päätelaitteet ovat yhdistettynä suoraan tukiasemaan. Koska päätelaitteet ovat yhdistettynä suoraan tukiasemiin, on verkon rakenteesta saatu pitkäikäisempi ja laitteiden virrankulutus on alhainen. Verkoissa käytetään tähti-topologiaa. Verkoilla yhteistä on myös se, että laitteet eivät kuuntele taajuuskanavia ennen lähetystä. Tällä varmistetaan verkon energiatehokkuus. Verkot voivat kommunikoida kahdella eri tavalla: ylälinkillä ja alalinkillä. Ylälinkkilähetys tarkoittaa päätelaitteen viestin lähetystä tukiasemille. Tukiasema lähettää viestin eteenpäin palvelimille. Alalinkkilähetys on päinvastoin palvelimen viestin lähettämistä päätelaitteille. (Mekki ym. 2018, s.414)

#### 3.1 LoRa

LoRa on langaton LPWAN -ratkaisu, joka hyödyntää kerrostekniikkaa. LoRa nimitys tulee sanoista ”Long Range”. LoRa on patentoitu sen käyttämän hajaspektritekniikan osalta. LoRa moduloi signaaleja alle 1 GHz ISM kaistalla. Euroopassa taajuus on 868 MHz, Pohjois-Amerikassa 915 MHz ja Aasiassa 433 MHz. ISM on teollisuuden, tieteen ja lääketieteen käyttöön tarkoitettu radiotaajuus. (Mekki ym. 2018, s. 414-416) Se on hyvin kehittynyt ja kaupallisessa käytössä. (Mekki ym. 2019, s. 4-5)

LoRa – verkko rakennetaan päätelaitteista, yhdyskäytävistä (gateway) ja palvelimista (LoRa Alliance 2015, s.8). LoRa -tekniikkaa hyödyntävässä verkossa on kaksisuuntainen tiedonsiirto mahdollista CSS:än (Chirp spread spectrum) ansiosta. CSS – modulaatio levittää kapeakaistaisen signaalin leveämmälle taajuuskaistalle. Signaalissa on vähän kohinaa ja sitä on vaikea häiritä. CSS:än ansiosta LoRa ei ole niin altis häiriöille. LoRa:ssa käytettävät hajautuskertoimet mahdollistavat tiedonsiirtonopeuteen ja kantaman vaihteluun mukautumisen. Hajautuskertoimia on yhteensä kuusi. Hajautuskertoimia käytettäessä on myös mahdollista vastaanottaa kaksi eri viestiä samanaikaisesti kun on käytetty eri hajautuskertoimia. Viestin maksimikoko on 243 tavua. Tiedonsiirtonopeus on 300 bps ja 50 kbps välillä. Tiedonsiirtonopeus on riippuvainen kaistanleveydestä ja edellä mainitusta hajautuskertoimesta. (Mekki ym. 2018, s. 414)

Viestintäprotokolla LoRaWAN on LoRa:an pohjautuva ja standardisoitu. Kun laitteiden väliseen viestintään käytetään LoRaWAN -protokollaa, on jokainen lähetetty viesti mahdollista vastaanottaa millä laitteella tahansa. (Mekki ym. 2018, s.414) Yleensä jokaisen päätelaitteen lähettämää viestiä luetaan jokaisessa yhdyskäytävässä ja jokainen viestin vastaanottanut yhdyskäytävä lähettää viestin eteenpäin palvelimelle käyttäen Ethernet:iä, matkapuhelinverkkoa tai Wi-Fi:ä (The LoRa Alliance 2015, s. 9). Tällä ominaisuudella LoRaWAN:in luotettavuus kasvaa. Hyvän luotettavuuden saavuttamiseksi täytyy kuitenkin tukiasemien lukumäärää kasvattaa, mikä tuo lisäkustannuksia verkon käyttöönottoon. LoRaWAN -verkon kapasiteettia on mahdollista skaalata jopa 8 -kertaiseksi muuttamalla tiedonsiirtonopeuksia (The LoRa Alliance 2015, s. 10). Kun jokainen laite pystyy vastaanottamaan saman viestin, syntyy viesteistä kopioita. LoRaWAN suodattaa kopioviestit taustapalvelimessa. Taustapalvelin myös tarkistaa viestien turvallisuuden, kuittaa viestin ja lähettää viestin eteenpäin halutulle sovelluspalvelimelle. (Mekki ym. 2018, s. 414) LoRaWAN -verkot ovat epäsynkronoituja. Tämän vuoksi LoRaWAN:in kytkettyjen laitteiden akut kestävät kauemmin ja verkko on energiatehokas. (The LoRa Alliance 2015, s. 9)

LoRaWAN:in on mahdollista kytkeä suuria määriä erilaisia päätelaitteita, joilla saadaan IoT -sovellukseen haluttuja ominaisuuksia. Päätelaitteita on kolmea eri luokkaa: luokka A, B ja C.

Luokan A laitteet eli kaksisuuntaiset päätelaitteet mahdollistavat nimensä mukaisesti kaksisuuntaisen viestinnän. Luokan A laitteet sisältävät kaksi erillistä vastaanottoikkunaa ja ne ovat auki ainoastaan päätelaitteen oman tarpeen mukaan. (Mekki ym. 2018, s. 414) Päätelaitteen viestin lähetyksen jälkeen A-luokan laitteet avaavat kaksi vastaanottoikkunaa, joilla mahdollinen vastaus palvelimelta voidaan vastaanottaa. Jos palvelimelta halutaan lähettää muulla ajanhetkellä viesti päätelaitteelle, tulee viestin odottaa seuraavaa viestiä päätelaitteelta palvelinta kohden. Tällöin kaksi vastaanottoikkunaa ovat auki. (The LoRa Alliance 2015, s.11)

Luokkaan B kuuluvat kaksisuuntaiset päätelaitteet, jotka on varustettu ajastetulla vastaanotolla. Erona luokan A laitteisiin luokan B laitteissa on yksi ylimääräinen

vastaanottoikkuna. Tämä ikkuna toimii ajastettuna, jonka vuoksi verkkopalvelin tietää milloin laite vastaanottaa. (Mekki ym. 2018, s. 415)

Luokan C kaksisuuntaiset päätelaitteet ovat päätelaitteita maksimaalisella vastaanotolla. Luokan C päätelaitteiden vastaanottoikkunat ovat auki lähes jatkuvasti. Vastaanottoikkunat ovat kiinni ainoastaan, kun päätelaite lähettää tietoa. Luokan C päätelaitteet kuluttavat enemmän virtaa, mutta tarjoavat parempaa suorituskykyä ja pienempää viivettä. (Mekki ym. 2018, s. 415)

LoRa on tarkoitettu pääosin käyttöön, jossa päätelaite lähettää ainoastaan muutamia tavuja kerrallaan (Augustin ym. 2016, s. 3). LoRaWAN:ssa on kaksi tietoturvakerrosta. Toinen on verkkoa ja toinen sovellusta varten. Verkon suojaus tarkistaa ja varmentaa päätelaitteiden turvallisuuden ja aitouden. Sovelluksen suojaus ei päästä verkko-operaattoria loppukäyttäjän sovellustietoihin käsiksi. (The LoRa Alliance 2015, s. 11)

LoRa-verkko on otettu käyttöön 58:ssa eri maassa. (LoRa Alliance 2020) Suomessa LoRa-verkkoa tarjoaa Digita. Digita tarjoaa käyttäjille maanlaajuista verkkoa, mutta myös asiakaskohtaisia ja yksityisiä verkkoja on mahdollista ottaa käyttöön. (Digita 2020) Digitan LoRa-verkko kattaa koko Suomen. IoT-sovelluksia on helppo ottaa käyttöön ihan missä paikassa vain ilman erillistä järjestelmien yhteensovittamista. Suomessa Digitan LoRa-verkko on otettu käyttöön myös oppilaitoksissa. Vuonna 2018 LoRa-teknologiaa oli mahdollista käyttää opetukseen mm. Helsingissä, Jyväskylässä, Tampereella ja Pohjois-Savossa. Digitan IoT-verkkoa käytetään myös Salon IoT Park:ssa ja Espoon IoT Pajassa. (Digita 2018) Ulvilassa verkkoa käytetään vuodesta 2020 eteenpäin vesimittareiden etäluentaan. (Digita 2020)

### **3.2 Sigfox**

Sigfox on kehitetty Ranskassa vuonna 2010 ja se on saanut nimensä startup- yrityksestä. Sigfox on yritys, mutta myös LPWAN operaattori. Sigfox:lla on toimintaa noin 30 eri maassa. Se toimii yhteistyössä monien eri verkko-operaattoreiden kanssa. Kantama Sigfox:lla on 10 km kaupunkialueilla ja haja-asutuksessa 40 km. Sigfox käyttää omia

tukiasemiaan. Tukiasemat on varustettu kognitiivisilla ohjelmistoradioilla. (Mekki ym. 2019, s.2)

Sigfox on yksinkertainen pystyttää. Pystyttämiseen tarvitaan vain kuitu- tai DSL-yhteys, virtalähde ja korkea paikka tukiasemalle. Päätelaitteet ovat halpoja ja yksinkertaisia. Ne ovat yleensä myös toimittomassa tilassa (idle). (Dano 2015) Päätelaitteet lähettävät viestit tukiasemille ja tukiasemilta viestit lähetetään edelleen Sigfox:n pilvipalveluun. Pilvipalvelusta viestit ohjataan loppukäyttäjälle. Päätelaitteet voi lähettää viestin tapahtuman seurauksena tai lähetys voi olla tietyn väliajoin tapahtuvaa. (Sigfox 2016) Tukiasemat yhdistetään palvelimiin IP-pohjaisen verkon kautta. Sigfox:ssa käytetään BPSK (Binary Phase-Shift Key) -modulaatiota. Päätelaitteet yhdistetään tukiasemiin erittäin kapealla alle 1 GHz ISM kaistan kantoaallolla. Kaistanleveys on 100 Hz luokkaa. Sigfox:ssa käytettävä kaista on lisensoimaton ISM -kaista. Taajuus Pohjois-Amerikassa on 915 MHz, Euroopassa 868 MHz ja Aasiassa 433 MHz. Kapean kaistan (UNB) ansiosta taajuuskaistaa käytetään tehokkaasti. Sigfox:ssa kohina on pientä, mikä vaikuttaa virrankulutukseen alentavasti. Sen ansiosta myös vastaanottimen herkkyyks on korkea ja antennisuunnittelu on edullista. (Mekki ym. 2019, s.2) Sigfox -verkon energiankulutusta on saatu alennettua sillä, että päätelaite on hereillä ainoastaan silloin kun se haluaa lähettää viestin (Smith 2016). Sigfox käyttää modifioitua ALOHA -protokollaa (Reynders ym. 2016, s. 1). Viestintäprotokolla SigFox:ssa on kevyempi verrattuna perinteisiin protokolleihin. Tällä ominaisuudella on SigFox -verkon energiankulutusta saatu laskettua ja verkon kapasiteettia nostettua. (Sigfox 2016)

Tiedonsiirtonopeus Sigfox:ssa on 100 bps. Tiedonsiirto on kehittynyt kaksisuuntaiseksi. Viestien lukumäärä ylälinkkiin lähetettäessä on rajoitettu 140 kappaleeseen päivässä. Alalinkkiin lähetettävien viestien maksimimäärä on rajoitettu 4 kappaleeseen. Rajoitukset johtuvat Sigfox:in MAC -kerroksesta (Reynders ym. 2016, s.1). Viestin maksimikoko ylälinkkiin lähetettäessä on 12 tavua ja alalinkkiin lähetettäessä 8 tavua. Alalinkin tiukemman rajoituksen takia jokaiselle ylälinkkiin lähetettävälle viestille ei saada kuitausta. Tämän ongelman ratkaisemiseksi joudutaan viestinnän luotettavuus varmistamaan aika- ja taajuusdiversiteettiä hyödyntämällä. Lähetysten päällekkäisyyttä käytetään myös hyödyksi. Viestit lähetetään yleensä useamman kerran eri taajuuskanavilla. Päätelaitteet voi satunnaisesti valita käyttämänsä taajuuskanavan, koska

tukiasemat kykenevät vastaanottamaan viestejä samanaikaisesti kaikilla kanavilla. Päätelaitteiden kustannukset laskevat ja suunnittelu helpottuu tämän ominaisuuden myötä. (Mekki ym. 2019, s.2)

Sigfox ei itsessään rakenna verkkojaan, vaan se tekee yhteistyötä paikallisten verkko-operaattoreiden kanssa (Dano 2015). Sigfox on ottanut käyttöönsä myös LTE -tekniikkaan perustuvaa tietoliikennettä. Uusi ratkaisu hyödyntää Sigfox:in ja matkapuhelinverkkojen hyviä ominaisuuksia. Sigfox takaa pitkän iän akuille ja matkapuhelinverkko mahdollistaa korkean tiedonsiirtokyvyn. (Alleven 2017)

Suomessa Sigfox-verkkoa tarjoaa Connected Finland. Connected Finlandin Sigfox-verkko peittää tällä hetkellä noin 90 % Suomen väestöstä. Verkon kattavuus on parhainta Etelä-, Keski- ja Länsi-Suomessa. Meri-Lapissa verkon kattavuus on myös hyvä. Pohjois- ja Itä-Suomessa kattavuus on heikko. Verkon kattavuus on keskittynyt suurten asutuskeskusten läheisyyteen. Verkon käyttöönotto tapahtuu sopimuksella Connected Finlandin kanssa. (Connected Finland) Connected Finlandin IoT verkossa oli vuonna 2019 120 000 liitettyä laitetta. (Connected Finland 2019)

### 3.3 NB-IoT

NB-IoT on kapeakaistainen IoT-tekniikka. NB-IoT perustuu LPWAN (Long Range Wide Area Network) tekniikkaan. NB-IoT on standardisoitu 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project:in (3GPP) toimesta. NB-IoT voi toimia sekä GSM:n (global system for mobile communications), että LTE:n (long term evolution) kanssa rinnakkain. NB-IoT:ssa hyödynnetään QPSK modulaatiota. NB-IoT toimii lisensoituilla matkapuhelinverkon taajuuksilla esim. 700 MHz, 800 MHz ja 900 MHz. NB-IoT:n käyttämä 200 KHz taajuuskaista vastaa yhtä resurssilohkoa LTE ja GSM lähetyksissä. (Mekki ym. 2019, s.3) Suurin osa NB-IoT:ssa käytetyistä taajuuksista on LTE:n alemmalla alueella, sillä monet konetyypistä dataa lähettävät laitteet ovat vaikeissa olosuhteissa radioliikenteen suhteen. NB-IoT on suunniteltu lyhyitä epäsäännöllisiä viestejä varten. (Rohde & Schwarz 2016, s. 8 ja s. 24)



NB-IoT:lla on kolme erilaista toimintaoperaatiota: stand-alone, guard band ja in-band. Esimerkki stand-alone -toiminnasta on, että GSM-operaattori ottaa NB-IoT:n käyttöön omalle GSM taajuuskaistalleensa. Guard band -toiminnassa käytetään hyödyksi käyttämättömiä resurssilohkoja LTE-kantoaallon suojakaistalla. In-band -toiminnassa hyödynnetään käyttämättömiä resurssilohkoja LTE-kantoaallossa. (Mekki ym. 2019, s.4)

NB-IoT:n viestintäprotokolla on kehitetty LTE-protokollan pohjalta. Protokolla on synkronoitu. Protokolla on jaettu kahteen eri tasoon; käyttäjä- ja ohjaustaso. Tukiasema ja päätelaitteet muodostavat toistensa välille kokonaisuuden, jota kutsutaan soluksi. Käyttäjän pääsy soluihin NB-IoT:ssa on sama kuin LTE:ssä. (Sinha ym. 2017, s.17) NB-IoT:n etuna on se, että se tehostaa tiettyjä LTE-protokollatoimintoja sovelluksen vaatimusten mukaan. Tätä hyödynnetään esimerkiksi siinä, että LTE:n backend pystyy lähettämään kaikille solun laitteille olevaa hyödyllistä tietoa. Backend halutaan kuitenkin pitää minimaalisena, sillä se kuluttaa paljon energiaa ja se näkyy verkon kustannuksissa. Backend:llä lähetetään vain kooltaan pieniä viestejä. Se välttää toimintoja, jotka eivät kuulu sovelluksen IoT-toimintaan. Tämän vuoksi NB-IoT:sta on saatu energiatehokas, kun päätelaitteet vaativat vain pienen määrän tehoa. (Mekki ym. 2019, s.4) Koska NB-IoT:sta halutaan mahdollisimman yksinkertainen laitekustannusten ja energiankulutuksen vuoksi, karsiutuu LTE tekniikasta monia ominaisuuksia. NB-IoT:ssa ei esimerkiksi ole mahdollista kanavanvaihto tai kanavan laadun mittaukset. (Sinha ym. 2017, s.16)

NB-IoT verkossa on mahdollista yhdistää jopa 100 000 laitetta yhtä solua kohden ja tätä määrää voidaan lisätä vielä tukiasemia lisäämällä. NB-IoT:ssa ylälinkkiin lähetettäessä käytetään yhden kanta-aallon taajuuskanavointia (FDMA) ja alalinkkiin lähetettäessä ortogonaalista OFDMA:ta. Ortogonaaliset aallot eivät häiritse jo valmiina olevia NB-IoT sovelluksia ja LTE-verkkoja (Liberg ym. 2018, s. 225). NB-IoT käyttää myös nelivaiheista vaiheavainnusta. Tiedonsiirtonopeus ylälinkkiin lähetettäessä on rajoitettu 20 Kbps ja alalinkkiin lähetettäessä 200 Kbps. Viestien maksimikoko NB-IoT:ssa on 1600 tavua. (Mekki ym. 2019, s.4) Kantama NB-IoT:ssa on alle 10 km ja sitä ei voi käyttää LTE-verkkojen ulkopuolella (Mekki ym. 2018, s. 415-416).

NB-IoT -verkkoa Suomessa tarjoaa Elisa ja DNA. Elisan NB-IoT -verkko on käytettävissä kaikkialla manner-Suomessa. Palvelun saa käyttöönsä ostamalla NB-IoT -liittymän. Elisalla on ollut valmius NB-IoT -verkon osalta jo vuonna 2017. NB-IoT -verkon kattavuus Suomessa on hyvä, sillä Suomessa on edistynyt ja kattava LTE-infrastrukturi. Elisan NB-IoT voi hyödyntää myös 5G-verkkoa, jolloin yhä suurempia tietomääriä voidaan siirtää nopeasti. (Elisa 2019) Myös 5G-verkon kattavuus Suomessa on hyvä. Yleisesti NB-IoT soveltuu käyttöön Suomessa hyvin, koska Suomen LTE-infrastrukturi ja matkapuhelinverkkojen kattavuus ovat erinomaisia.

NB-IoT -verkkoa tarjoaa Suomessa myös DNA. DNA:n NB-IoT -verkko toimii niin 4G kuin 5G-standardeissa. DNA:n NB-IoT -verkko on tuettuna koko Etelä-, Länsi- ja Keski-Suomessa. Verkko on tuettu myös useilla Itä- ja Pohjois-Suomen paikkakunnilla. (DNA 2020)

## 4 VERTAILU

Internet of Things -verkon valintaan ja vertailuun vaikuttavat monet asiat. Kun on kyseessä tietoliikenneverkot, verkkojen Quality of Service on yksi merkittävä vertailukohde. Myös verkkojen suorituskykyä, akunkestoa, hintaa, kuuluvuutta, viivettä, turvallisuutta ja käyttökohteita tulee verrata. Seuraavaksi tässä työssä verrataan edellä esiteltyjä verkkoja näiden ominaisuuksien osalta.

**Taulukko 1. Taulukossa esitetty verkkojen ominaisuuksia.**

	NB-IoT	LoRa	Sigfox
<b>Taajuudet</b>	700, 800 ja 900 MHz (LTE)	433, 868 ja 915 MHz (ISM)	433, 868 ja 915 MHz (ISM)
<b>Lisensioitu</b>	Kyllä	Ei	Ei
<b>Synkronoitu</b>	Kyllä	Ei	Ei
<b>Modulaatio</b>	QPSK	CSS	BPSK
<b>Maksimikantama</b>	10km	20 km	40 km
<b>Maksimi tiedonsiirtonopeus</b>	200 000 bps	50 000 bps	100 bps
<b>Viestin maksimikoko</b>	1600 tavua	243 tavua	8 tavua (AL) ja 12 tavua (YL)

## 4.1 Quality of Service

Verkkojen QoS vaihtelee suuresti. Verkon synkronoinnilla on suuri vaikutus verkon QoS:ään. LoRa ja Sigfox eivät kumpikaan ole synkronoituja ja ne toimivat lisensoimattomilla taajuuksilla. LoRa ja Sigfox sietävät häiriöitä hyvin ja kohina on pientä. Ne eivät kuitenkaan vastaa QoS:än osalta NB-IoT:n tasoa. NB-IoT toimii LoRa:sta ja Sigfox:sta eroten lisensoiduilla taajuuksilla ja sen protokolla perustuu LTE:en. NB-IoT on myös synkronoitu. NB-IoT:n korkea QoS vaikuttaa kuitenkin sen kustannuksiin. Kustannukset lisensoiduilla taajuuksilla ovat suuremmat kuin lisensoimattomilla. Täten NB-IoT sopii paremmin kohteisiin ja sovelluksiin, joissa tarvitaan hyvää QoS:ää. LoRa ja Sigfox ovat taas hyviä vaihtoehtoja, kun korkea QoS ei ole tarpeellinen ominaisuus. Sigfox on kuitenkin kehittänyt myös LTE-tekniikkaan perustuvaa tietoliikennettä käyttöönsä, jonka avulla sen QoS nousee.

## 4.2 Suorituskyky

IoT -sovellusten kehittyessä tulee verkkoihin pystyä yhdistämään yhä enemmän päätelaitteita. LoRa, Sigfox ja NB-IoT -verkkoihin on mahdollista kytkeä suuri määrä laitteita. Verkoissa on hyvät skaalausominaisuudet. LoRa verkkoa on mahdollista skaalata suuremmaksi tiedonsiirtonopeuden kustannuksella. NB-IoT kuitenkin tarjoaa näistä kolmesta korkeimman kantokyvyn laitteiden lukumäärälle ja lukumäärää voidaan kasvattaa lisäämällä tukiasemia.

Tiedonsiirtonopeuksissa on eroja verkkojen välillä. Korkean tiedonsiirtokyvyn merkitys on jatkuvasti kasvussa, sillä verkoilta vaaditaan entistä nopeampaa tiedonsiirtoa. LoRa:n tiedonsiirtonopeus on hyvin skaalattavissa 300 bps ja 50 000 bps välillä. Tiedonsiirtonopeus riippuu täysin kaistanleveydestä ja hajautuskertoimesta. Sigfox-verkossa tiedonsiirto nopeus on matalampi (100 bps). NB-IoT on verkoista kuitenkin nopein. Sen tiedonsiirtonopeus alalinkkiin päin on 20 000 bps ja ylälinkkiin 200 000 bps. Nopeaa tiedonsiirtoa vaativien sovellusten parhain vaihtoehto on täten NB-IoT.

Kuten tiedonsiirtonopeuksissa, myös viestien maksimikoossa on eroja verkkojen välillä. LoRa -verkossa viestin maksimikoko on 243 tavua ja NB-IoT:ssa 1600 tavua. Sigfox -

verkossa viestinmaksimikoko on näistä verkoista pienin. Maksimikoko alalinkkiin lähetettäessä on 8 tavua ja ylälinkkiin lähetettäessä 12 tavua. Sigfox:ssa viestien lukumäärää on myös rajoitettu. Päivässä se voi vastaanottaa 140 kpl viestiä ja lähettää 4 viestiä päätelaitteille. LoRa ja NB-IoT sopivat siis huomattavasti paremmin suuren tietomäärän siirtämiseen. Sigfox on suunniteltu enemmän epäsäännölliseen ja vähäisen tiedon siirtoon.

### 4.3 Akunkesto ja hinta

LoRa ja Sigfox ovat synkronoimattomia, joten niiden päätelaitteiden akunkesto on parempi kuin NB-IoT:ssa. LoRa ja Sigfox -verkoissa päätelaitteet ovat ns. 'idle' -tilassa niin kauan kunnes niiden tulee lähettää tai vastaanottaa tietoa. LoRa -verkon eri päätelaitetyypit mahdollistavat vielä pienemmän energiankulutuksen ja -optimoinnin. NB-IoT:n synkronoinnin takia NB-IoT:n päätelaitteet kuluttavat enemmän virtaa kuin LoRa ja Sigfox -verkkojen päätelaitteet.

Hinta ja kustannukset ovat tärkeitä seikkoja verrattaessa IoT -verkkoja. Verkkojen kokonaiskustannuksiin sisältyy yleisesti lisenssi, verkon käyttöönotto ja laitteiden hinnat. Koska LoRa ja Sigfox toimivat lisensioimattomilla taajuuksilla, maksu taajuudesta eli lisenssistä on nolla. NB-IoT taas toimii lisensioituilla taajuuksilla, joten sen lisenssi maksaa. Taajuuden hinnaksi NB-IoT:ssa on arvioitu 500 M€/MHz. Käyttöönottomaksut verkoissa ovat eroavaisia. LoRa-verkon käyttöönotto maksaa yli 100 €/gateway ja yli 1000 €/tukiasema. Sigfox:ssa pelkkä tukiasema maksaa yli 4000 €/tukiasema. NB-IoT:ssa hinta tukiasemalle on yli 15 000 €. Päätelaitteiden kustannukset ovat suhteellisen matalat, mutta niiden lukumäärä tuo kustannuksiin ison osan. LoRa ja Sigfox-verkon päätelaitteet ovat alle 5 € luokkaa, mutta NB-IoT:ssa hinta on 20 €/laite. (Sinha ym. 2017, s.19)

### 4.4 Kuuluvuus ja viive

Verkkojen kantavuudet ovat kehittyneet niin edistyneiksi, että jopa yksi tukiasema voi kattaa yhden kaupungin alueen. LoRa -verkossa kantavuus on 20 km luokkaa ja se on otettu käyttöön jo 42 eri maassa (Mekki ym. 2019, s.5). LoRa – verkko voi automaattisesti

muuttaa hajautuskertoimiaan, jos sen kantama ei riitä tai lähetys epäonnistuu (Augustin ym. 2016, s.9). Se kuitenkin häviää kantavuudessa Sigfox:lle. Sigfox -verkon maksimietäisyyden kerrotaan olevan 40 km eli kaksinkertaisesti pidempi kuin LoRa:ssa. NB-IoT:n kantama on kaikista heikoin sen ollessa ainoastaan 10 km. NB-IoT on suunniteltu toimivaksi ja käytettäväksi sovelluksissa, joissa päätelaitteet ovat normaalin radioliikenteen suhteen vaikeissa paikoissa. NB-IoT:ta rajoittaa myös sen LTE-infrastruktuurin riippuvuus. LoRa -verkko on tähän verrattuna adaptiivisempi ja joustavampi. LTE-infrastruktuurin riippuvuuden takia NB-IoT:n kuuluvuus saattaa olla jopa joissain tapauksissa LoRa -verkkoa huonompi.

Viive NB-IoT verkossa on kahteen muuhun verkkoon nähden pienin (Sinha ym. 2017, s.19). LoRa -verkossa suurempi viive toisaalta pienentää laitteiden virrankulutusta. LoRa kuitenkin tarjoaa mahdollisuuden myös pienempään viiveeseen C luokan päätelaitteilla. Luokan C laitteet kuluttavat täten enemmän virtaa. Sigfox:sta ei tällaista ominaisuutta löydy. Kun IoT-sovellus vaatii pientä viivettä, ovat NB-IoT tai LoRa C luokan päätelaitteilla parhaita vaihtoehtoja. Kun viiveellä ei ole suurta merkitystä, LoRa A luokan päätelaitteilla tai Sigfox ovat sopivia vaihtoehtoja.

## 4.5 Turvallisuus

Verkkojen turvallisuus ja yksityisyys on tärkeää. Yritykset haluavat suojata omaa tuotantoaan ja toimintaansa kilpailijoilta. LoRa:n käyttämässä LoRaWAN:ssa on kaksi tietoturvakerrosta: verkon suojaus ja sovelluksen suojaus. Verkon suojauksen tehtävä on tarkistaa ja varmentaa päätelaitteiden turvallisuus ja aitous. Sovelluksen suojaus estää verkko-operaattorin pääsyn loppukäyttäjän sovellustietoihin. (The LoRa Alliance 2015, s.9-11)

Sigfox käyttää jokaisessa päätelaitteen lähettämässä viestissä tunnusavainta, jolla lähetettävä viesti tunnistautuu. Viestit lähetetään myös kolmesti kolmella eri taajuudella. Tukiasemat ovat myös yhdistettynä Sigfox:n palvelimiin Virtual Private Network:n (VPN) avulla, joka on kryptattu. Päätelaitteet Sigfox -verkossa eivät voi vastaanottaa viestejä ulkopuolisista lähteistä. (Sigfox 2017, s.6)

NB-IoT:ssa on myös käytössä siihen yhdistyneiden laitteiden ja viestien varmentaminen. Viestit ovat kryptattuja, joten niiden lukeminen on hankalaa, vaikka viestiin pääsisi käsiksi. Myös viestien manipulaatioon on NB-IoT:ssa turvaus. Ongelma NB – IoT:n turvallisuudessa tulee esiin kun tieto lähetetään verkon palvelimilta lopulliseen pilvipalvelimeen internetin välityksellä. NB-IoT tarjoaa kuitenkin ongelmaan ratkaisuja. Verkon palvelimen ja pilvipalvelimen välinen tiedonsiirto voidaan hoitaa Virtual Private Network:n (VPN) kautta tai käyttämällä UDP -suojausprotokollaa. (Ligero ym. 2018)

## 4.6 Käyttökohteet

Työssä tarkasteluilla verkoilla on monia eri käyttökohteita, ja ne siirtyvät jatkuvasti laajempaan käyttöön. Verkkojen käyttö ja valinta riippuu pitkälti verkon ominaisuuksista ja käyttökohteen vaatimuksista. Kaikilla kolmella verkolla on omat etunsa ja puutteen. Alla käydään läpi esimerkki käyttökohteita LoRa, NB-IoT ja Sigfox -verkoille. Samalla verrataan verkkojen soveltuvuutta kyseiseen kohteeseen.

### 4.6.1 Mittalaitteet

Internet Of Things on nousemassa hyvin suureen rooliin erilaisissa mittalaitteissa ja kunnonvalvonnassa yleisesti. Kunnonvalvonnan mittalaitteilta vaaditaan pientä viivettä ja korkeaa tiedonsiirtokykyä. Niitä käytetään myös jatkuvasti, joten verkon tulee soveltua jatkuvaan käyttöön. Yleensä käyttöympäristöt tällaisille mittalaitteille on teollisuusympäristö, joten tämän vuoksi mittalaitteiden energiankulutus ei ole ongelma (Mekki ym. 2019, s.6). NB-IoT täyttää nämä vaatimukset hyvin. Niin kuin työssä on aiemmin mainittu, on NB-IoT:ssa pieni viive ja se soveltuu suureen datamäärän siirtämiseen hyvällä nopeudella. Mittalaitteiden käyttö teollisuudessa takaa myös sen, että laitteet ovat LTE-verkkojen kuuluvuusalueella, joten NB-IoT:n käyttö ei rajoitu siihen. LoRa tarjoaa myös pienellä viiveellä olevaa verkkoa ja se on kustannuksien osalta parempi vaihtoehto. LoRa -verkkoa käytettäessä voidaan hyödyntää luokan C laitteita, joilla on pieni viive. NB-IoT takaa kuitenkin paremman tiedonsiirtokyvyn. Tämä ominaisuus on suuri etu, sillä monet online-mittaukset ovat yleensä kriittisiä tuotannon toiminnan kannalta. Sigfox ei sovellu käytettäväksi ainakaan pientä viivettä vaativiin mittauksiin johtuen sen suuresta viiveestä. Vaikka jotkin mittaukset ovat mahdollisia

tehdä suurella viiveellä, on pieni viive suuri etu. Yrityksen ei tarvitse rakentaa kahta verkkoa eri käyttötarkoituksiin, vaan kaikki voidaan hoitaa yhdellä verkolla.

#### 4.6.2 Älyrakennukset ja -kaupungit

IoT – sovellukset ovat laajentuneet myös nykyaikaisiin rakennuksiin ja kaupunkeihin. IoT -verkoja voidaan hyödyntää kaupungeissa esimerkiksi pysäköinninvalvonnassa, jätehuollossa ja valaistuksessa. Rakennuksissa IoT:ta voidaan käyttää palovaroittimissa, hälytysjärjestelmissä ja rakennuksen automaatiossa. (Kuhlins ym. 2020) Älykaupungeissa ja -rakennuksissa käytettävien IoT-verkkojen kustannukset ja laitteiden energiankulutukset tulee olla matalia. Myöskään jatkuvaa lähetystä ja suurien datamäärien siirtoa ei vaadita. Viiveellä suurimassa osassa älyrakennuksien ja -kaupunkien sovelluksissa ei ole merkitystä. Alhaiset kustannukset poissulkevat NB-IoT:n sen ollessa tässä työssä vertailluista verkoista kallein. Kustannukset LoRa:ssa ja Sigfox:ssa ovat matalammat. LoRa-verkon eri päätelaiteluokista voidaan valita kaikista vähiten energiaa kuluttavin. Sigfox-verkossa laitteet ovat myös energiatehokkaita, sillä ne lähettävät ainoastaan tarpeen vaatiessa.

Sigfox-verkkoa käytetäänkin älykaupungeissa mm. parkkipaikkojen valvonnassa, ruokaloiden ruoan lämpötilamittauksissa ja kulutustiedon keräämisessä. Myös vesihuollossa hyödynnetään Sigfox:ia. Älyrakennuksissa Sigfox:ia käytetään esim. palovaroittimissa ja jätehuollossa. (Sigfox 2020)

#### 4.6.3 Maatalous

Kuten teollisuudessa, myös maataloudessa hyödynnetään IoT-verkkoja. Maatalouden IoT-sovelluksia on nykyisin jo paljon. IoT-verkkoja maataloudessa käytetään kosteus- ja lämpötilamittauksiin, mutta myös maaperän ravinnemittauksiin ja sääennustuksiin. Tärkeimpänä vaatimuksena IoT -verkolle maataloudessa on laitteiden pitkä elinikä. (Ayaz ym. 2019, s.3-6) Tietoa ei tarvitse siirtää jatkuvasti toisin kuin teollisuuden online-mittauksissa. Verkon tulee myös kattaa laaja pinta-ala ja lähetysmatkat voivat olla hyvinkin pitkiä. NB-IoT:n vaatima LTE-infrastrukturi luo haasteen sen hyödyntämiseen maataloudessa. Alueilla, joissa maataloutta on, ei välttämättä ole mahdollisuutta LTE -verkoille. LoRa ja Sigfox toimivat hyvin myös haja-asutusalueilla. Ne eivät tarvitse LTE



-infrastruktuuria. Kantama LoRa:lla ja Sigfox:lla on hyvä haja-asutusalueilla. Ne soveltuvat myös hyvin ajoittaiseen tiedonsiirtoon ja etuna niissä on matala energiankulutus. LoRa ja Sigfox soveltuvat täten parhaiten maatalouden IoT-sovellutuksiin. Sigfox:ia käytetään maataloudessa mm. varastotilojen tarkkailuun, sää- ja maaperämittauksiin sekä aitauksen porttien tarkkailuun (Sigfox 2020). LoRa:a hyödynnetään esim. lämpötila- ja kosteusmittauksissa (Ayaz ym. 2019, s.14).

## 5 YHTEENVETO

Kandidaatintyöni tarkoituksena oli perehtyä ja vertailla kolmea eri Internet of Things -verkkoa. Vertailtavia verkkoja olivat LoRa, Sigfox ja NB-IoT -verkot. Yksittäisten verkkojen tekniikkaan ja toimintaan ei menty kovin syvällisesti, sillä vertailun kannalta tärkeämpiä olivat niiden ominaisuudet. Työn alussa kerrottiin ja pohjustettiin yleisellä tasolla mitä IoT-verkot ovat, miten ne toimivat ja missä niitä käytetään. Yleisen tason esittelystä siirryttiin verkkokohtaiseen tarkasteluun ja pohjustukseen. Tämän jälkeen kolmea verkkoa vertailtiin eri ominaisuuksien kannalta. Lopuksi myös tarkasteltiin jokaisen verkon soveltuvuutta yleisimpiin IoT-käyttöympäristöihin ja -kohteisiin. Toteutetun työn perusteella pystytään tekemään valinta, mikä verkko on soveliaain tiettyyn käyttökohteeseen. Työssä pyrittiin käyttämään mahdollisimman uusia lähteitä ja tutkimuksia johtuen verkkojen nopeasta kehityksestä viimeisten vuosien aikana.

Työssä saatiin aikaan hyvä käsitys LoRa, Sigfox ja NB-IoT -verkkojen ominaisuuksista ja toiminnasta. Jokaisesta verkosta saatiin niin hyvät kuin huonot ominaisuudet esiin. Verkoissa oli paljon eroavaisuuksia niin tekniikan kuin käyttökohteen suhteen. IoT-verkkojen laajasta ja vaihtelevasta käyttöympäristöstä johtuen verkkojen huonot ominaisuudet saattoivat olla vahvuuksia. Toisaalta myös jotkin verkkojen vahvuudet ilmenivät heikkouksiksi tietyissä käyttökohteissa. Jokaiselle verkolle on siis oma käyttökohteensa, johon se on soveliaain ja eroaa muista edukseen. Suuri rooli verkon valinnassa onkin käyttökohteen vaatimukset verkon suhteen.

IoT-verkot kehittyvät jatkuvasti nopeaa vauhtia. Uusia verkkoja luodaan, mutta myös jo valmiina olevia kehitetään jatkuvasti eteenpäin. Verkoilta vaaditaan yhä nopeampaan tiedonsiirtoa ja suurten tietopakettien siirtämistä. Nykysuunta teknologiassa yleisesti on yhä enemmän langattomaan viestintään päin, jolloin IoT-verkkojen asema yhteiskunnassa ja teollisuudessa nousee. Tämän seurauksena käyttökohteet laajenevat ja IoT:ta tuodaan yhä erilaisiin ympäristöihin. Tällöin verkoista vaaditaan erilaisia ominaisuuksia ja soveltuvuutta kyseessä olevaan käyttökohteeseen. Verkkoja ei täten voi muodostaa samasta muotista, vaan niiden täytyy olla optimoituja ja räätälöityjä. Yksi suurimmista haasteista IoT-verkoissa on turvallisuus.

## LÄHDELUETTELO

Alleven, M., 2017. Sigfox combines cellular IoT with its own tech in GCT chip. Framingham, Questex Media Group. Saatavilla: <https://www.fiercewireless.com/wireless/sigfox-combines-cellular-iot-its-own-tech-gct-chip> [viitattu 20.2.2020]

Augustin, A., Yi, J., Clausen, T. H., Townsley, W., 2016. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9), s. 1466

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., Aggoune, E. M., 2019. Internet-of-Things (IoT)-based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk. *IEEE Access*, 7, s.129551-129583.

BCS, The Chartered Institute for IT, 2017. The Internet of Things: Living in a Connected World. Swinson: Swindon BCS Learning & Development, 50 s. ISBN 1-78017-333-4

Connected Finland. Peittoalue. Saatavissa: <https://www.connectedfinland.fi/peittoalue/> [viitattu 14.4.2020]

Connected Finland, 2019. Lehdistötiedotteet, Connected Finlandin IoT-verkossa jo 120 000 laitetta ja liittymää. Saatavissa: <https://www.connectedfinland.fi/lehdistotiedotteet-fi/connected-finlandin-iot-verkossa-jo-120-000-laitetta-ja-liittymaa/> [viitattu 14.4.2020]

Dano, M., 2015. Tech, IoT startup Sigfox launching 902 MHz network in U.S. Framingham, Questex Media Group. Saatavilla: <https://www.fiercewireless.com/tech/iot-startup-sigfox-launching-902-mhz-network-nationwide-u-s> [viitattu 2.2.2020].

DNA, 2020. Yrityksille, IoT, IoT-teknologiat, NB-IoT. Saatavissa: <https://www.dna.fi/yrityksille/iot/iot-teknologiat#nb-iot> [viitattu 14.4.2020]

Digi-Key Electronics, 2018. Articles, Speed Development of Secure Cellular Connected IoT Applications. Saatavissa: <https://www.digikey.fi/en/articles/speed-development-secure-cellular-connected-iot-applications> [viitattu 25.2.2020]

Elisa, 2019. Yrityksille, Ideat, Artikkelit ja asiakastarinat, Suomalaisyrietykset paalupaikalta 5G-teknologioita hyödyntämään. Saatavissa: <https://hub.elisa.fi/suomalaisyrietykset-paalupaikalta-5g-teknologioita-hyodyntamaan/> [viitattu 14.4.2020]

Holler, J., Karnouskos, S., Boyle, D., Avesand, S., Tsiatsis, V., Mulligan, C., 2014. Internet of Things. Burlington: Academic Press, 331 s. ISBN 1-306-57909-0

Kuhlins, C., Rathonyi, B., Zaidi, A., Hogan M., 2020. Cellular networks for Massive IoT. Sweden: Ericsson. Saatavissa: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-networks-for-massive-iot--enabling-low-power-wide-area-applications> [18.1.2020]. 16 s.

Liberg, O., Sundberg, M., Wang, E., Bergman, J., Sachs, J., 2017. Cellular Internet of Things: Technologies, Standards and Performance. Painos 1. Academic Press, 398 s. ISBN 9780128124598

Ligero, R., Patau, O., 2018. Blog, Security of NB-IoT devices. Saatavissa: <https://accent-systems.com/blog/security-of-nb-iot-devices/>

LoRa Alliance, 2020. LoRaWAN, LoRaWAN Coverage. Saatavissa: <https://loralliance.org/>

LoRa Alliance, 2017. What is LoRaWAN [verkkodokumentti] Saatavissa: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2019. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. ICT Express, 5 (1), s.1-7.

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., Meyer, F., 2018. Overview of Cellural LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN and NB-IoT. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/323907156\\_Overview\\_of\\_Cellular\\_LPWAN\\_Technologies\\_for\\_IoT\\_Deployment\\_Sigfox\\_LoRaWAN\\_and\\_NB-IoT](https://www.researchgate.net/publication/323907156_Overview_of_Cellular_LPWAN_Technologies_for_IoT_Deployment_Sigfox_LoRaWAN_and_NB-IoT)

RF Wireless World, 2012. Tutorials, Sigfox network architecture. Saatavissa: <https://www.rfwireless-world.com/Tutorials/Sigfox-network-architecture.html> [viitattu 11.3.2020]

Rohde & Schwarz, 2016. Narrowband Internet of Things [verkkodokumentti]. Munchen, Rohde & Schwarz. Saatavissa: [https://www.rohde-schwarz.com/fi/applications/narrowband-internet-of-things-white-paper\\_230854-314242.html](https://www.rohde-schwarz.com/fi/applications/narrowband-internet-of-things-white-paper_230854-314242.html) [viitattu 21.2.2020]

Rouse, M., Gillis, A., Rosencrance, L., Shea, S., Wigmore, I., 2020. Mobile endpoint security: What enterprise infosec pros must know now, internet of things (IoT). TechTarget: IoT agenda. Saatavissa: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT> [20.1.2020]

Ryenders, B., Meert, W., Pollin, S., 2016. Range and coexistence analysis of long-range unlicensed communication. Thessaloniki: 2016 23<sup>rd</sup> International Conference on Telecommunications, s.1-6.

Sigfox, 2016. What is Sigfox, Technology [verkkodokumentti]. Ranska: Sigfox. Saatavissa: [https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology#id\\_technology](https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology#id_technology) [viitattu 20.2.2020].

Smith, I., 2016. Sigfox – A new network technology for IoT comms [verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.embeddedrelated.com/showarticle/926.php> [viitattu 21.2.2020].

Sinha, R. S., Wei, Y., Hwang, S-H., 2017. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3 (1), s.14-21.

Watts, S., 2016. *The Internet of Things (IoT): Applications, Technology and Privacy Issues*. New York: Nova Science Publishers, Inc, 118 s. ISBN 1-63484-626-5